

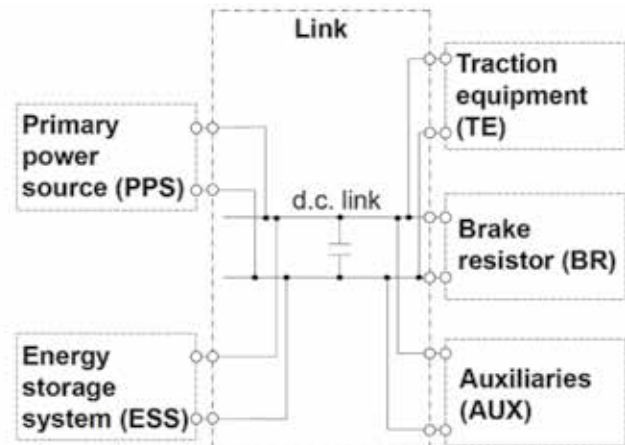
Janusz Biliński

Napędy trakcyjne z zasobnikami energii (typy, konfiguracje, ograniczenia)

W ostatnich latach można zaobserwować intensywny rozwój konstrukcji pojazdów z napędem autonomicznym, w szczególności dotyczy to pojazdów komunikacji miejskiej – autobusów elektrycznych, trolejbusów i tramwajów. Wiele miast w Polsce już eksploatuje bądź przygotowuje się do zakupu autobusów elektrycznych, także tramwaje są już wyposażane w zasobniki energii. Zasobniki takie najczęściej wykorzystują baterie akumulatorów i/lub baterie superkondensatorów.

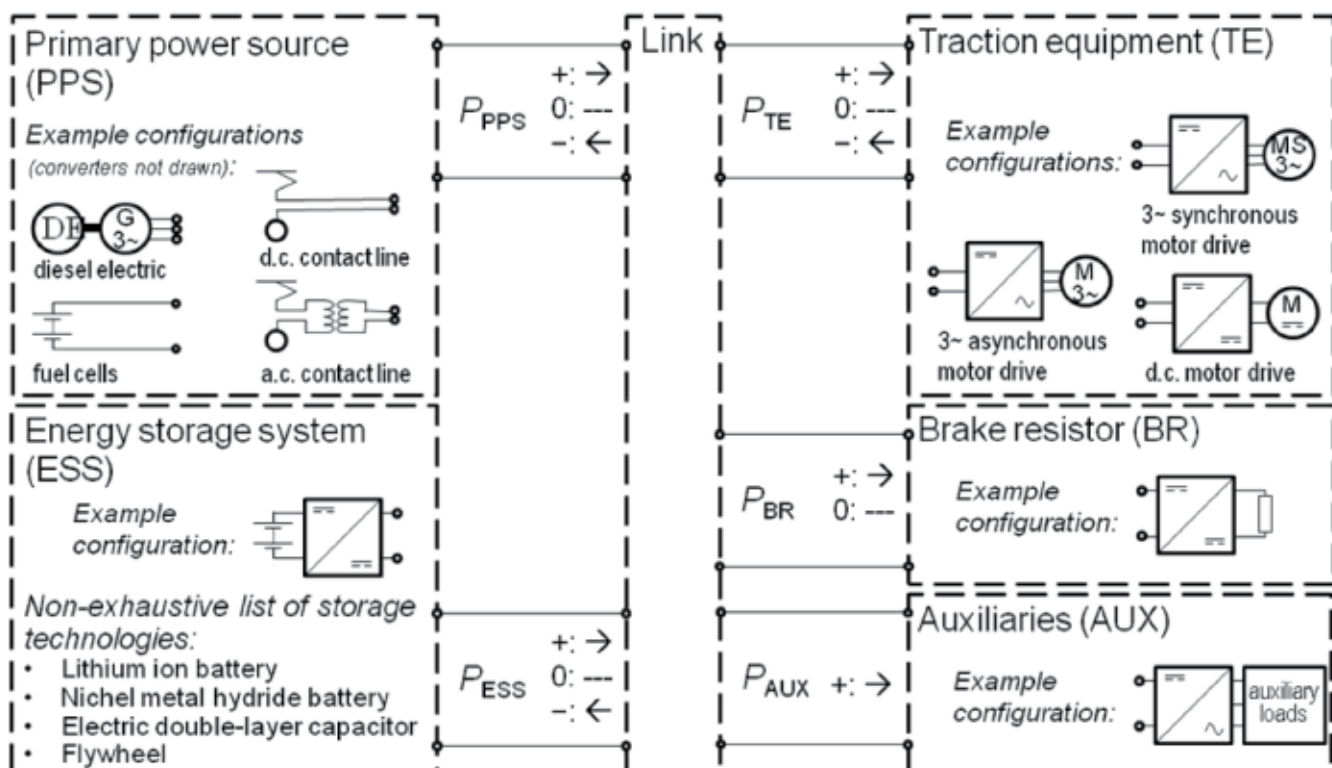
System pokładowego zasobnika energii w pojeździe może być zdefiniowany jako system hybrydowy. System hybrydowy posiada dwa (lub więcej) źródła energii, w tym system magazynowania energii (ang. Energy Storage System – ESS), zapewniając połączenie przekształtników, falowników trakcyjnych, silników oraz sterowanie zarządzaniem zużycia energii. Dzięki takiemu rozwiązaniu można:

- ♦ poprawić efektywność energetyczną i paliwową pojazdu,
- ♦ poprawić charakterystykę przyspieszenia,
- ♦ zwiększyć zasięg i zapewnić nieprzerwane funkcjonowanie w przypadku utraty zasilania ze źródła podstawowego (ang. Primary Power Source – PPS),
- ♦ wyeliminować lub złagodzić ograniczenia podstawowego źródła zasilania, zmniejszając szczytowy pobór mocy,
- ♦ zmniejszyć zużycie paliwa i emisji (np. CO₂, NO_x, PM, etc.),
- ♦ zredukować negatywny wpływ na środowisko (np. eliminacja sieci, hałasu, itp.).

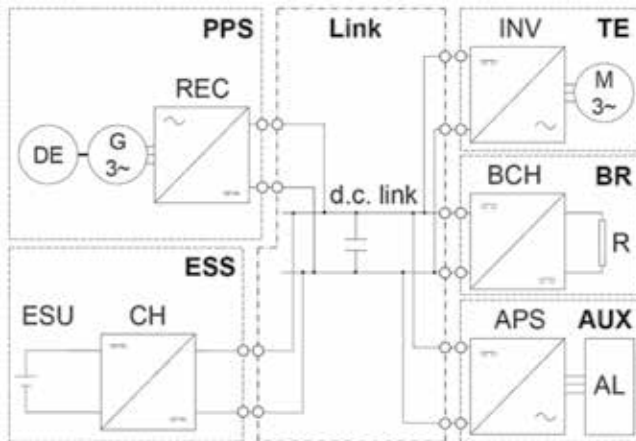


Rys. 1. Schemat blokowy szeregowego układu hybrydowego napędu trakcyjnego z połączeniem wszystkich bloków systemu do linii DC (DC-link)

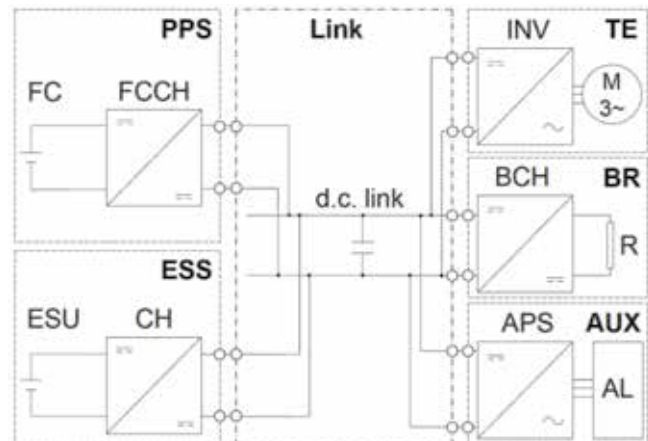
System hybrydowy może występować jako system równoległy lub szeregowy. System równoległy to system, w którym siła pociągowa jest wytwarzana przez kilka silników i przekazywana do zestawów kołowych przez system transmisyjny. System szeregowy to system, w którym falownik trakcyjny, zasilany z kilku źródeł, za-



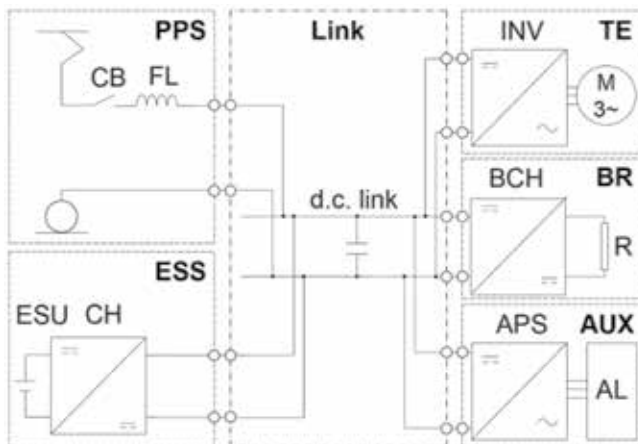
Rys. 2. Schemat blokowy szeregowego układu hybrydowego napędu trakcyjnego



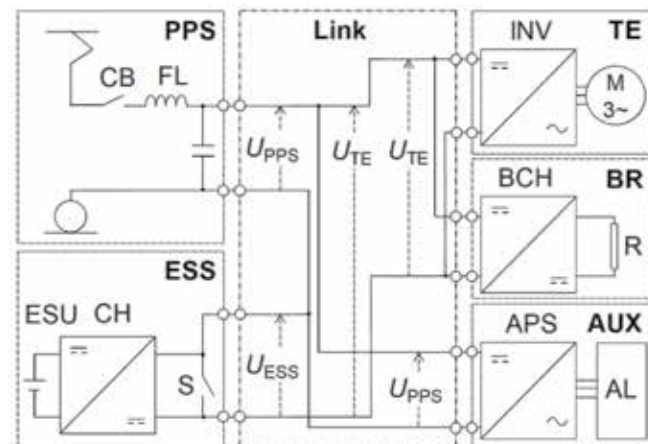
Rys. 3. Schemat blokowy układu napędu spalinowego z przekładnią elektryczną, gdzie: DE – silnik spalinowy, REC – prostownik, ESU – element zasobnikowy, CH – chopper zasobnika, INV – falownik trakcyjny, BCH – chopper hamowania, R – rezystor, APS – przetwornica statyczna, AL – obwody pomocnicze



Rys. 4. Schemat blokowy układu napędu zasilanego z sieci DC z równoległym połączeniem z zasobnikiem, gdzie: CB – wyłącznik szybki, FL – dławik filtra, ESU – element zasobnikowy, CH – chopper zasobnika, INV – falownik trakcyjny, BCH – chopper hamowania, R – rezystor, APS – przetwornica statyczna, AL – obwody pomocnicze



Rys. 5. Schemat blokowy układu napędu zasilanego z sieci DC z równoległym połączeniem z zasobnikiem, gdzie: CB – wyłącznik szybki, FL – dławik filtra, ESU – element zasobnikowy, CH – chopper zasobnika, INV – falownik trakcyjny, BCH – chopper hamowania, R – rezystor, APS – przetwornica statyczna, AL – obwody pomocnicze



Rys. 6. Schemat blokowy układu napędu zasilanego z sieci DC z szeregowym połączeniem z zasobnikiem, gdzie: CB – wyłącznik szybki, FL – dławik filtra, ESU – element zasobnikowy, CH – chopper zasobnika, INV – falownik trakcyjny, BCH – chopper hamowania, R – rezystor, APS – przetwornica statyczna, AL – obwody pomocnicze, U_{PPS} – napięcie sieci, U_{ESS} – napięcie zasobnika, U_{TE} – napięcie zasilania falownika, S – odłącznik zasobnika

sila silnik trakcyjny. Poniżej przedstawiono analizę odnoszącą się do systemu szeregowego.

Szeregowy układ hybrydowy jest zasilany z co najmniej dwóch źródeł energii, w tym z zasobnika energii. Odbiorcą jest układ napędowy lub rezystor hamowania, w sytuacji, gdy układ zasobnikowy nie jest w stanie odebrać nadmiaru energii – na przykład w czasie hamowania odzyskowego.

Jednym z najczęściej stosowanych rozwiązań układu jest połączenie wszystkich bloków systemu do linii DC (DC-link), co przedstawiono na rysunku 1.

Na rysunku 2 przedstawiono uogólniony schemat blokowy szeregowego systemu hybrydowego pojazdu trakcyjnego. System taki składa się z pięciu głównych podsystemów:

- ♦ podstawowego źródła zasilania (PPS),
- ♦ zasobnika energii (ESS),
- ♦ zespołu przekształtnika trakcyjnego z silnikiem (TE),
- ♦ rezystora hamowania (BR),
- ♦ jednej lub kilku przetwornic pomocniczych (AUX).

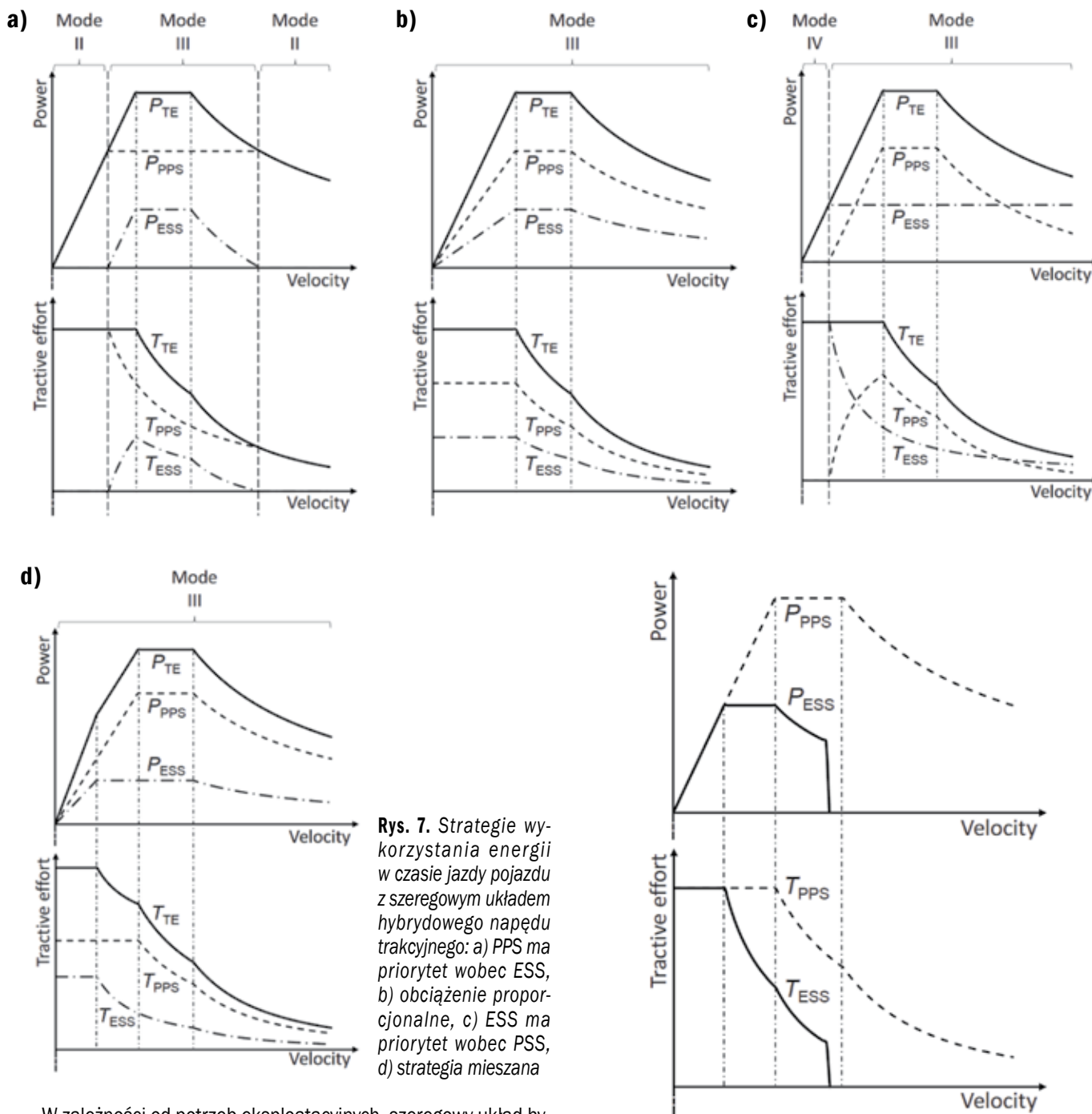
Podstawowe źródło zasilania nie ogranicza się wyłącznie do zasilania elektrycznego, może nim być zespół generatora spalinowego, ogniwa paliwowe, systemy trakcyjne DC i AC.

Przepływy energii między poszczególnymi blokami mogą być jedno- lub dwukierunkowe, co oznacza odbieranie lub dostarczanie energii do poszczególnych bloków. Znak przepływu energii odnosi się także do mocy na zaciskach poszczególnych bloków.

W układzie szeregowym można określić możliwe tryby pracy dla przepływu energii. Przedstawiono to w tabeli 1.

Poniżej przedstawiono schematy blokowe szeregowych układów hybrydowych napędów trakcyjnych:

- ♦ napęd spalinowy z przekładnią elektryczną – rysunek 3,
- ♦ napęd zasilany z ogniw paliwowych – rysunek 4,
- ♦ napęd zasilany z sieci DC z równoległym połączeniem zasobnika – rysunek 5,
- ♦ napęd zasilany z sieci DC z szeregowym połączeniem zasobnika – rysunek 6.



Rys. 7. Strategie wykorzystania energii w czasie jazdy pojazdu z szeregowym układem hybrydowego napędu trakcyjnego: a) PPS ma priorytet wobec ESS, b) obciążenie proporcjonalne, c) ESS ma priorytet wobec PSS, d) strategia mieszana

Rys. 8. Przykład charakterystyk pojazdu z szeregowym układem hybrydowego napędu trakcyjnego w „trybie awaryjnym”

W zależności od potrzeb eksploatacyjnych, szeregowy układ hybrydowego napędu trakcyjnego może realizować różne strategie wykorzystania energii w czasie jazdy pojazdu, co przedstawiono na rysunku 7:

- ♦ pobór energii ze źródła ma priorytet wobec poboru z zasobnika (rys. 7a) lub jest proporcjonalny (rys. 7b),
- ♦ pobór energii z zasobnika ma priorytet wobec poboru ze źródła (rys. 7c) lub jest strategią mieszaną (rys. 7d).

W przypadku, gdy pojazd wykorzystuje do jazdy tylko moc i energię z zasobnika, która jest mniejsza od wymaganego zapotrzebowania trakcyjnego, parametry trakcyjne pojazdu będą ograniczone (prędkość, siła pociągowa). Taki tryb jazdy jest czasami określany jako „tryb awaryjny” (ang. „degraded mode”), przykładowe charakterystyki przedstawiono na rysunku 8.

W wielu przypadkach ten tryb jest traktowany jako standardowy podczas jazdy autonomicznej.

Podsumowanie

Przy projektowaniu układów napędowych z zasobnikami do zastosowań trakcyjnych należy rozpatrywać nie tylko strukturę układu napędu czy wymagania energetyczne. Wymagania konstrukcyjne dla pojazdów szynowych czy drogowych narzucają szereg dodatkowych ograniczeń (masa, wymiary, oddziaływanie na środowisko, trwałość) wynikających z norm EN, Kart UIC czy specyficznych wymogów samych źródeł energii. Szybki rozwój konstrukcji, dostępność nowych technologii źródeł energii (baterii akumulatorów, superkondensatorów) pozwoli na wdrożenie ich w pojazdach trakcyjnych, zwłaszcza w pojazdach miejskiego transportu publicznego.

Tab. 1. Podstawowe tryby pracy szeregowego układu hybrydowego napędu trakcyjnego

Tryb pracy	Moc źródła (sieci)	Moc zasobnika	Moc napędu trakcyjnego	Moc przetwornicy	Moc rezystora hamowania	Opis trybu pracy	Nr schematu blokowego			
	P_{PPS}	P_{ESS}	P_{TE}	P_{AUX}	P_{BR}		3	4	5	6
I	+	-	+	+	0	Ładowanie dodatkowe w czasie przyspieszania i jazdy	T	T	T	N
II	+	0	+	+	0	Zasilanie tylko ze źródła	T	T	T	T
III	+	+	+	+	0	Przyspieszanie/rozruch	T	T	T	T
IV	0	+	+	+	0	Jazda autonomiczna	X	N	T	N
V	-	+	+	+	0	Zasilanie źródła i sieci z zasobnika	T	T	T	N
VI	+	-	0	+	0	Ładowanie zasobnika ze źródła	T	T	T	T
VII	-	+	0	+	0	Zasilanie sieci z zasobnika	X	N	T	N
VIII	-	+	-	+	0	Hamowanie odzyskowe – zasilanie sieci z zasobnika i zwrot energii do sieci	X	N	T	N
IX	-	0	-	+	0	Hamowanie odzyskowe – tylko zwrot energii do źródła	T	N	T	T
X	-	-	-	+	0	Hamowanie odzyskowe – tylko energii do zasobnika i źródła	T	N	T	T
XI	0	-	-	+	0	Hamowanie odzyskowe – tylko ładowanie zasobnika	T	T	T	N
XII	+	-	-	+	0	Ładowanie dodatkowe w czasie hamowania odzyskowego	T	T	T	N
XIII	+	0	0	+	0	Jazda wybiegiem	T	T	T	T
XIV	0	+	0	+	0	Jazda wybiegiem, zasilanie tylko z zasobnika	T	T	T	N
XV	-	-	-	+	+	Hamowanie z zasilaniem rezystora hamowania, ładowaniem zasobnika i źródła	T	N	T	T
XVI	-	0	-	+	+	Hamowanie z ładowaniem tylko źródła	T	N	T	T
XVII	0	-	-	+	+	Hamowanie z ładowaniem tylko zasobnika	T	T	T	N
XVIII	0	0	-	+	+	Hamowanie z zasilaniem tylko rezystora hamowania	T	T	T	T

T/N – możliwość trybu pracy (Tak/Nie), X – tryb rzadko wykorzystywany w tej konfiguracji

Bibliografia

- Badin F., *Hybrid Vehicles. From Components to System*, Editions TECHNIP, Paris 2013.
- Beretta J., *Automotive Electricity. Electric Drives*, ISTE Ltd, London 2010.
- Biliński J., Figat J., Milewski D., *Tramwaj z zasobnikiem akumulatorowym – koncepcja i testy*, „Technika Transportu Szynowego” 2015, nr 1-2.
- Díaz-González F., Sumper A., Gomis-Bellmunt O., *Energy Storage in Power Systems*, Wiley, 2016.
- Ehsani M., Gao Y., Gay S. E., Emadi A., *Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles. Fundamentals, Theory and Design*, CRC Press, 2005.
- Giziński P., *Kondensatorowy zasobnik energii do pojazdów trakcji elektrycznej*, „Technika Transportu Szynowego” 2007, nr 1-2.
- IEC 62864-1: *Railway applications – Rolling stock – Power supply with onboard energy storage system – Part 1: Series hybrid system*.
- Lacote F., *Innovative solutions for a perfect integration in the city*, UITP 2005, Rome 2005.
- Link A. N., O'Connor A. C., Scott T. J., *Battery Technology for Electric Vehicles*, Routledge, 2015.
- Maciołek T., *Zastosowanie zasobników energii w trakcji kolejowej 3 kV DC – nieodległa perspektywa?*, „Technika Transportu Szynowego” 2015, nr 9.
- Nikowitz M., *Advanced Hybrid and Electric Vehicles. System Optimization and Vehicle Integration*, Springer, 2016.
- Perez-Pinal F. J., *An Integrated Electric Vehicle Curriculum. Electric Vehicles. The Benefits and Barriers*, InTech, 2011.
- Shibuya H., Kondo K., *Designing Methods of Capacitance and Control System for a Diesel Engine and EDLC Hybrid Powered Railway Traction System*, IEEE Trans, On Industrial Electronics, vol. 58, no. 9, 2011.
- Steiner M., Klohr M., *Energy Storage System with UltraCaps on Board of Railway Vehicles*, Bombardier Transportation, 2011.
- Steiner M., *MITRAC Energy Saver: a new area in energy efficiency*, UITP 2005, Rome 2005.
- Steiner M., Scholten J., *Energy Storage on board of railway vehicles*, EPE 2005, Dresden 2005.
- Steiner M., Scholten J., *Energy Storage on board of railway vehicles*, WCRR 2006, Montreal 2006.
- Steiner M., Scholten J., Steinegger H., Jenewein, T., *Energy Storage Systems for Improved Efficiency of Railway Vehicles*, WCRR, Köln 2001.
- Young K., Wang C., Wang L., Strunz K., *Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks*, Power Electronics and Power Systems, Springer, New York 2013.

Autor:

dr inż. **Janusz Biliński** – Dyrektor ds. Rozwoju Trakcji. MEDCOM Sp. z o.o. Warszawa

Traction drives with Energy Storage Systems (types, configurations, limitations)

In the paper structures of traction drives with Energy Storage Systems were presented. The serial structures as most popular in traction vehicles were described. Example block diagrams of a series hybrid systems with five main subsystems, i.e. one primary power source (PPS), one ESS, one traction equipment, one APS and its loads, and one brake resistor as a secondary power sink were presented. Basic modes of operation with energy flows were described, showing limitations of modes of particular configurations. Traction characteristics of vehicle equipped with traction systems with integrated Energy Storage Systems were discussed, showing ways of reduction of peak power consumptions during acceleration of vehicle. The energy and power available from the ESS are limited and therefore the maximum power and maximum velocity are also limited in such degraded mode operation. For these examples the behavior of the power supply by Energy Storage System is assumed to be constant within a certain speed range, but can have different behavior depending on ESS technologies.